

命を支える

2 力覚提示機能を有する手術支援ロボット



川嶋 健嗣
KAWASHIMA Kenji
東京医科歯科大学
生体材料工学研究所/教授

近年、傷口が小さく患者の負担を低減させる手術支援ロボットを用いた手術が広く行なわれている。しかし現状では、画像情報に頼っており、触った感覚は術者に伝わらない。感触を持つ手術支援ロボットの開発を紹介する。

最近の外科手術

近年、外科や泌尿器科等において低侵襲外科手術が広く行なわれている。本手術は図1のように術者が細い筒(トロッカー)から鉗子類を入れ、別の穴から挿入した内視鏡(スコープ)の映像を観察しながら体内で縫合等の手術を行うものである。開腹手術より傷口が小さいことから、患者の痛みの低減、入院期間の短縮や傷跡の縮小など患者のQOL(Quality of Life)が高い。日本内視鏡外科学会の調査では、1997年では4万件弱であった症例数が、2009年には約12万件となっており、毎年右肩上がりで伸びている¹⁾。

一方本手術は、トロッカーが挿入された腹壁を支

点として鉗子類を動かすため、対象物への自由なアプローチが容易ではなく、高度な技術と熟練を必要とする。よって、現場の医師の要望もあり、本手術をサポートする機器開発のニーズは極めて高い。

手術支援ロボットの現状

上記の背景から、ロボット技術により鉗子先端を多自由度化する等の内視鏡手術を支援する医療機器開発の研究が盛んに行われている²⁾。米国インテュイティブ・サージカル社により製品化されたda Vinciが有名であり、そこで用いられているマスタスレーブ方式は、術者がマスタデバイスを操作すると体内に挿入されたスレーブ側の多自由度鉗子(鉗子マニ

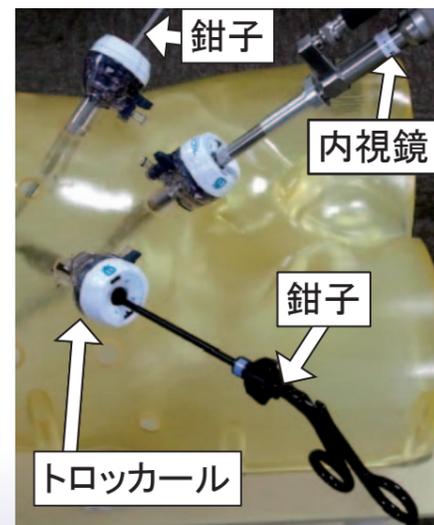


図1 内視鏡手術のイメージ

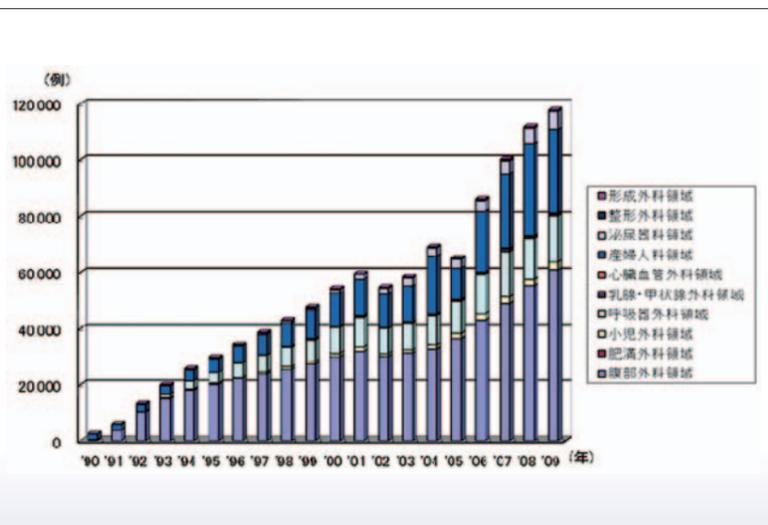


図2 内視鏡外科手術件数の推移¹⁾

ピュレータ)が同期して動くことから、術者の手があたかも体内にあるような直感的な操作が可能である。また、マスタ側での手振れはスレーブ側に伝わらない補正が導入されている。さらに、マスタでの操作量とスレーブ側での移動量の比率を変更できる。つまり、細かい操作にも対応できる。現在米国では全体の1/4に当たるおよそ1,400もの病院に、少なくとも一台da Vinciが導入されている。

しかし、現状のロボットでは操作を内視鏡からの画像情報に頼っている。つまり触った感覚は術者には伝わらない。手術支援ロボットは主に癌等の切除によって2つに分かれた臓器や血管をつなぐ際の縫合作業に用いられる。より正確で安全な作業のために、術者への糸の張力等の力覚提示が望まれている。そのためには鉗子先端での外力測定のため、力センサの搭載が考えられる。しかし、小型化、滅菌、洗浄など実用面を考慮すると取り付けは容易ではない。医療機器開発においては、多重の安全性確保は言うまでもなく、滅菌洗浄、清潔部分と不潔部分の明確な切り分け(不潔部分は清潔なカバー等で覆う)等、運用を事前に十分検討した上での開発が重要である。

手術支援ロボット IBIS

著者らは空気圧駆動が減速機を用いて力を増幅することなく比較的大きな力を発生できることから、図3に示すスレーブ側鉗子マニピュレータに空気圧駆動を採用した力覚提示機能を有するコンパクトな遠隔手術支援ロボットシステムを開発し、その評価を実施している³⁾。

本研究開発はおよそ8年前から実施しており、半年毎の動物実験、医師からのヒアリング等の知見を基に、改造や新たな試作を繰り返し、現在5.1号機(IBIS Vと命名)となっている。医療機器開発におい



図3 手術支援ロボットIBIS

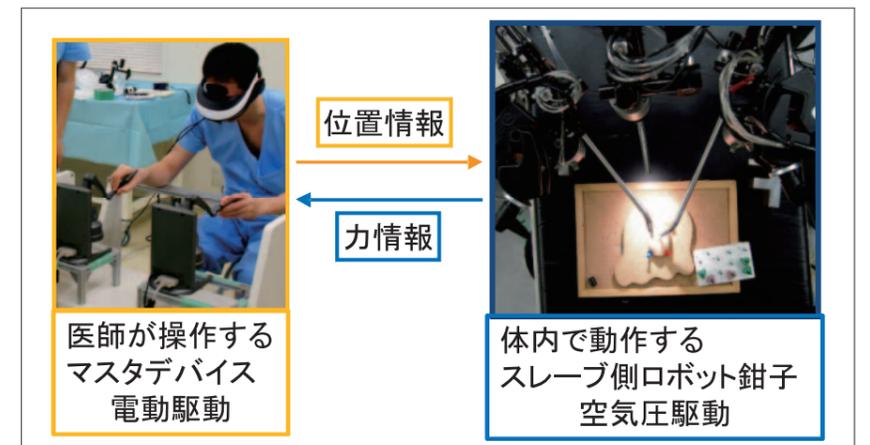


図4 IBISのシステム構成

ては、ユーザである医師との密な連携が必要不可欠である。試作品を医師に評価頂き、絶えずその情報をフィードバックして機器の開発改良に反映することが求められる。

本ロボットシステムはda Vinciと同様に、マスタスレーブシステムで遠隔操作が可能であり、かつ任意の位置、姿勢に鉗子先端を操作可能とするため、マスタ、スレーブ両側とも6つの独立した関節(6自由度)を有している。

図4にシステム構成の概略図を示す。マスタ側は滅菌洗浄の必要がないことから、力センサを配置し、電動駆動によって動作する。市販のマスタデバイスをを用いることができる。ゲーム機のジョイスティックを操作するイメージである。マスタ側からは操作者の位置情報がスレーブ側に送られる。スレーブ側は

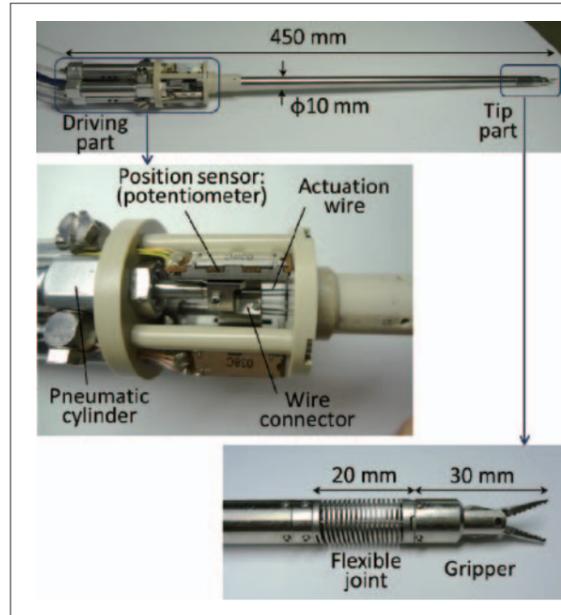


図5 柔軟関節構造を用いた鉗子マニピュレータ

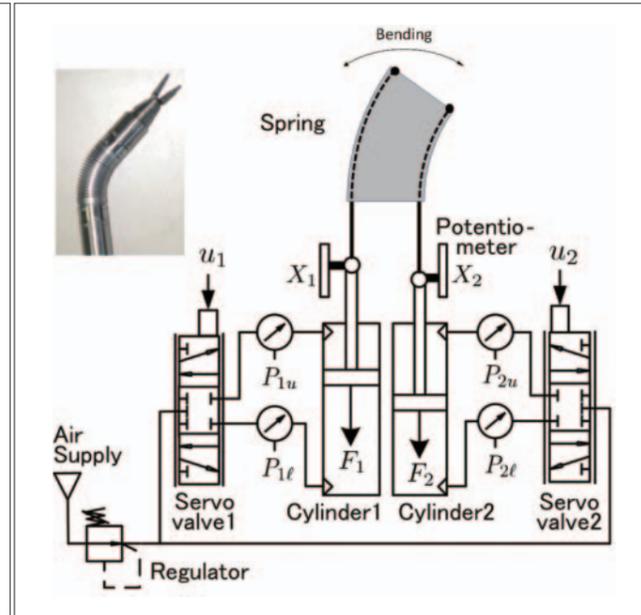


図6 空気圧シリンダを用いた拮抗駆動(1関節部分)

空気圧駆動によって減速機を不要とすることで、鉗子先端での接触力が入力側のアクチュエータの圧力に直接はね返る点に着目した。これによって、鉗子先端に力センサを搭載することなく、体外の鉗子根元に配置した空気圧アクチュエータの差圧を測定し、その値から鉗子先端での接触力を推定、操作者に反力として提示する方法を提案実装している。

スレーブ側鉗子マニピュレータはトロカールを介して体内に挿入することから、外径12mm以下であること、また鉗子先端に把持機構と2つの独立した関節を有することが求められる。細い外径の鉗子先端にいかに関節を配置し、それを駆動するかという課題を解決する必要がある。そこで、弾性体や連続体を主構造とする柔軟関節は、剛体リンク機構に比べはるかに構造が単純であることに注目した。柔軟関節にはシャフト、ベアリング、プーリなどの部品が一切無く、内部のスペースを広く使えるという利点があるため、主として内視鏡の屈曲機構に用いられている。これらは構造が非常に単純なため、本来小型化・多自由度化に適した構造であるが、マニピュレータに適用するためには機構の剛性を高めることが必要となる。そこで、関節の主構造に切削加工型の高性能スプリングを採用し、その内部に超弾性合金の補強を施すことによって、構成部品を減らしかつ剛性の高い屈曲機構を提案し、本機構を用いて屈曲2自由度を持つ鉗子マニピュレータを試作した(図5)。外殻のスプリングに4本のワイヤを通した構造となっており、図6に示す拮抗駆動によって屈曲が可能である。

図6は2自由度のワイヤ拮抗駆動系の内、1自由度部分を取り出した模式図である。2つの空気圧シリンダを、弁開度が入力電圧によって連続かつ高速に調整できる空気圧サーボ弁により制御する⁴⁾。これによって、空気圧シリンダを任意の位置に制御できる。空気圧シリンダは一般的に精密位置決め制御に不向きとの認識があるが、空気圧サーボ弁や制御用コンピュータの進展によって、飛躍的に高精度な制御が可能となっている。図6の構成を90°ずらしてもう1セット搭載することで、弾性体の左右前後の動作が可能となり、2自由度の関節駆動が実現できる。

鉗子を保持するロボットは体外で前後、左右、上下、回転の4つの自由度を有するものを開発し、これに体内で動作する図5の鉗子マニピュレータを搭載することで合計6自由度を実現している。

実験結果

鉗子マニピュレータの位置決め分解能を調べる実験を行った結果を図7に示す。この図に示すように、関節の左右の屈曲角度 θ の目標値を30°から35°まで、1秒ごとに1°刻みで変化させて位置制御を行った。この目標値入力に対し、関節角度の計測値は概ね1°刻みで確実に反応しており、本実験における柔軟関節の位置決め分解能は1°以下と分かる。この角度は先端位置としては0.1mm以下の分解能に相当する。目標値と計測値の間に一部偏差が生じているが、マスタスレーブシステムを用いて人間が操作する際に直観性を失わせるものではないため、特に問題

とならない。

次に、スレーブ側鉗子先端で6軸力センサを押し引きした際の実験結果を図8に示す。紙面の都合で図中の y, z 軸方向のみを示す。力センサで測定した値 f_{sensor} と、推定した外力 f_{slave} がよく一致しており、提案実装した外力推定方法が有効であり、かつマスタ側にその力が反力 f_{master} として提示されていることが分かる。なお、マスタスレーブ間の位置と力の比率は任意に設定することが可能である。

現在、東京医科歯科大学低侵襲医学研究センター他の協力を得て、図9に示すように定期的な動物実験を実施して、実用化に向けてシステムの改良を行っている。実用化には薬事承認が必要となる。医療機器は人体等に及ぼす危険度に応じて4段階のクラスに分類されており、手術ロボットは厳しい方から2番目のクラス3に該当すると考えられる。臨床実験等でその安全性を評価する必要があり、コストと時間を要する。リスクが高い分野であるが、精密工学の分野は日本が最も得意としていること、我が国の産業力強化のために国産の医療機器開発が強く望まれていることから、産学官の連携によって実用化まで持っていきたいと考えている。

<参考文献>

- 1) 日本内視鏡外科学会雑誌, Vol.15, No.5(2010)
- 2) 橋爪誠、手術ロボットの現状と将来、日本ロボット学会誌、22巻4号、pp.423/425(2004)
- 3) Kotaro Tadano, Kenji Kawashima, Development of a Master Slave System with Force-Sensing Abilities Using Pneumatic Actuators for Laparoscopic Surgery, Advanced Robotics, Vol.24, No.12, pp.1763-1783(2010)
- 4) 原口大輔、只野耕太郎、川嶋健嗣、柔軟関節を用いた空気圧駆動鉗子マニピュレータの開発(先端屈曲機構の簡略化と外力推定)、日本フルードパワーシステム学会論文集、Vol.43, No.3, pp.62-69(2012)

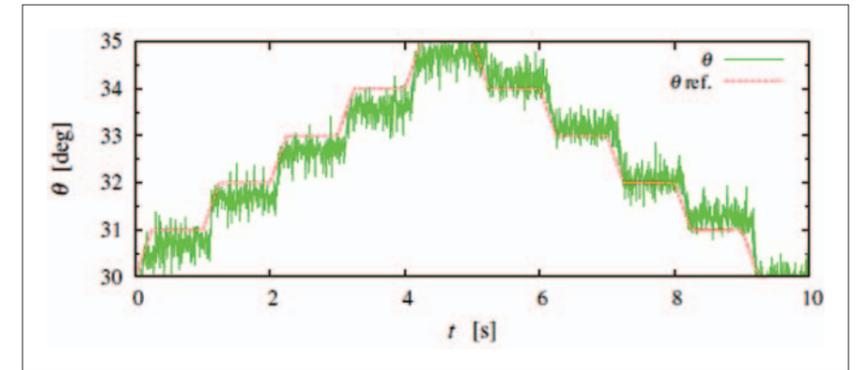


図7 位置決め分解能の実験結果

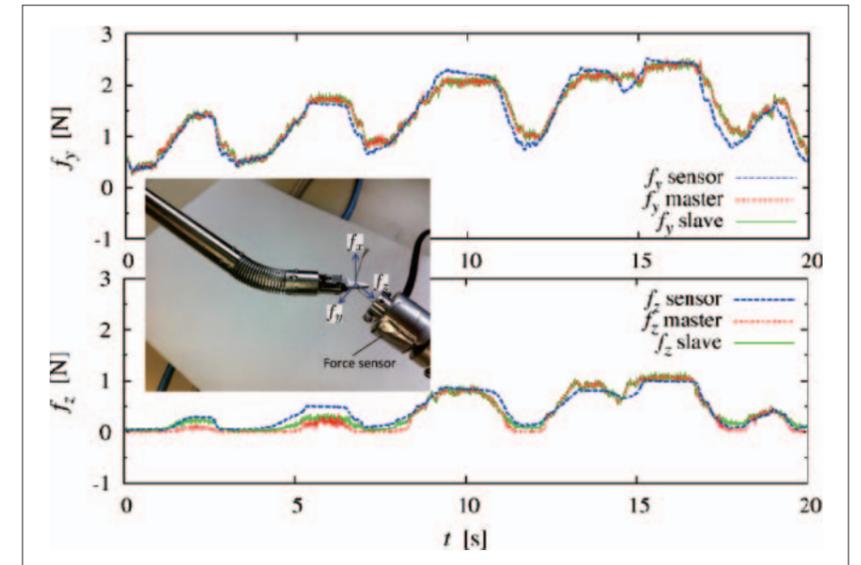


図8 鉗子マニピュレータ先端での外力推定実験結果

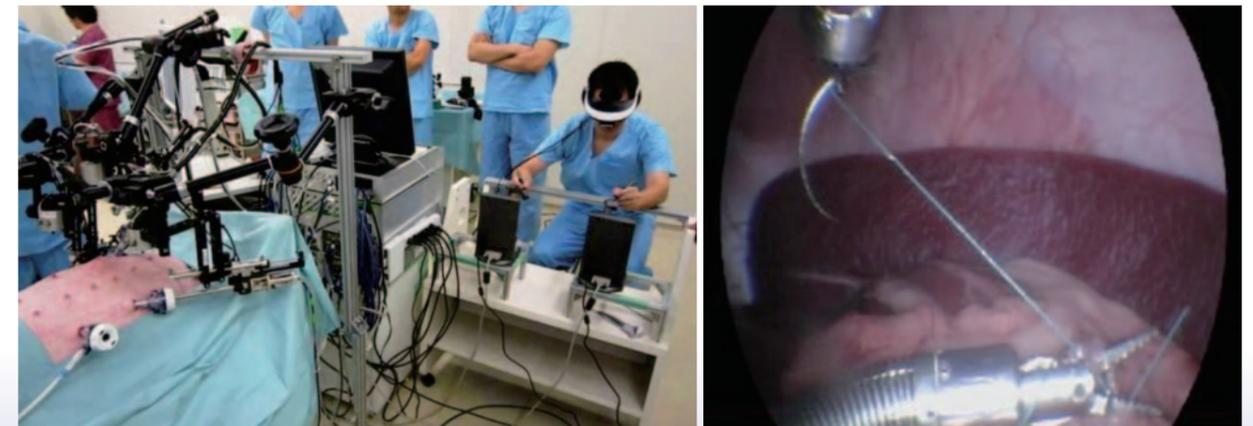


図9 動物実験の様子(右写真同じ)